

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
1 novembre 2001 (01.11.2001)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 01/81858 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ :
G01B 11/00, 11/02

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR01/01274

(22) Date de dépôt international : 26 avril 2001 (26.04.2001)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
00/05392 27 avril 2000 (27.04.2000) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) : COM-
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR];

31/33, rue de la Fédération, F-75752 PARIS 15ème
(FR): COMPAGNIE GENERALE DES MATIERES
NUCLEAIRES [FR/FR]; 2, rue Paul Dautier, F-78140
VELIZY-VILLACOUBLAY (FR).

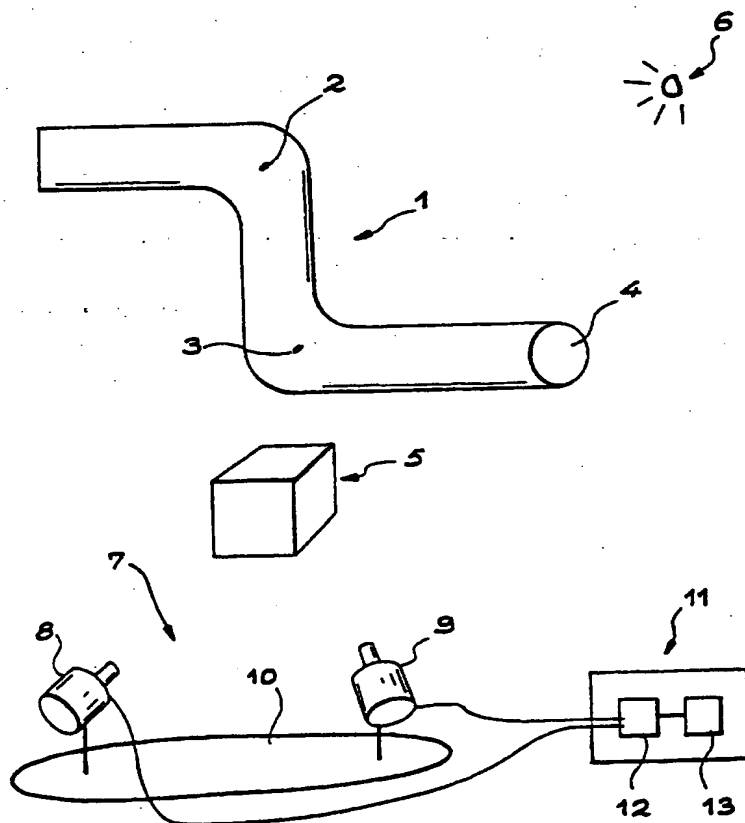
(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : VIALA,
Marc [FR/FR]; 6 Clos A. Daudet, F-78280 GUYAN-
COURT (FR). NAUDET, Sylvie [FR/FR]; Bat A Les
Pampres, Avenue de Champagne, F-91940 LES ULIS
(FR). SAYD, Patrick [FR/FR]; 151 Résidence des
Eaux-Vives, Rue L. Bourgeois, F-91120 PALAISEAU
(FR). COHEN, Laurent [FR/FR]; 32 rue Javelot, F-75013
PARIS (FR). DUMONT, Arnaud [FR/FR]; 11 rue des
Cordeliers, F-78320 MESNIL SAINT DENIS (FR). JAL-
LON, Frédéric [FR/FR]; 6 route Vieux Château, F-78125
POIGNY LA FORET (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR MEASURING A THREE-DIMENSIONAL OBJECT, OR ASSEMBLY OF OBJECTS

(54) Titre : PROCEDE DE MESURAGE D'UN OBJET TRIDIMENSIONNEL, OU D'UN ENSEMBLE D'OBJETS



(57) Abstract: The invention concerns a method whereby three-dimensional objects (1, 5, 6) of an environment which can be very complex can be observed by locating their simple contour forms on images, and then the geometrical characteristics, positions and orientations of said objects are measured. The contours are defined by simple parameters of length, inclination, position and the like. For each new image, the previously acquired knowledge of the environment is used to fine-tune the estimates while introducing into the model the new contours of the objects which have appeared.

(57) Abrégé : Dans ce système, des objets tridimensionnels (1, 5, 6) d'un environnement pouvant être très complexe sont discernés en repérant leurs formes simples de contour sur des images, puis on mesure les caractéristiques géométriques de ces objets et leurs positions et orientations. Les contours sont définis par des paramètres simples de longueur, d'inclinaison, de position, etc. A chaque nouvelle image, on utilise la connaissance acquise de l'environnement pour affiner les estimations tout en introduisant dans le modèle les nouveaux contours d'objets qui sont apparus.

WO 01/81858 A1



(74) Mandataire : LEHU, Jean; Brevatome, 3, rue du Docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).

(81) États désignés (national) : CA, JP, US.

(84) États désignés (régional) : brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

PROCÉDÉ DE MESURAGE D'UN OBJET TRIDIMENSIONNEL, OU D'UN ENSEMBLE D'OBJETS

DESCRIPTION

L'invention est un procédé qui permet de
5 déterminer la géométrie, la position et l'orientation
d'un ou plusieurs objets dans un environnement.
L'objectif est de fournir des informations
dimensionnelles ou de mesurage sur des primitives
tridimensionnelles (points, droites, cercles,
10 cylindres, ...) représentant ces objets en exploitant
une projection sur des images acquises par un ou
plusieurs capteurs. Ces données dimensionnelles sont
exploitées pour le contrôle dimensionnel d'objets
manufacturés (prototype ou série), la mesure de
15 déformation de structure, la modélisation
d'environnements industriels.

Il existe plusieurs grandes familles de
procédés pour accomplir ce genre de mesurages. Certains
impliquent une mesure directe des objets de
20 l'environnement par la pointe d'un palpeur, mais cette
méthode n'est pas toujours possible à appliquer et
devient très longue dès que l'environnement est
volumineux, encombré ou de forme compliquée ; elle est
impensable quand il a les dimensions d'un local entier.
25 D'autres méthodes recourent à la télémétrie, c'est-à-
dire qu'on mesure les distances à différents points de
l'environnement sans contact matériel ; un laser est
successivement dirigé vers ces points et la mesure
porte sur le temps de vol ou le déphasage de l'onde. Un

miroir ou un système mécanique est utilisé pour diriger incessamment le rayon du laser vers d'autres points, ce qui permet des mesurages rapides de l'environnement, mais on observe que cette méthode n'est pas toujours
5 très précise (bien que la résolution ne soit limitée que par le système de balayage du laser) et s'accompagne d'erreurs quand le faisceau touche des objets réfléchissants, et il faut aussi s'assurer de la stabilité du système mécanique pendant le balayage et
10 veiller à la sécurité des personnes susceptibles de se trouver dans le volume de mesure.

D'autres méthodes sont des méthodes optiques dans lesquelles une caméra est déplacée devant l'environnement à mesurer et prend une succession
15 d'images. Les détails de l'environnement sont identifiés sur les différentes images et leur position est calculée par des triangulations selon leur position sur les images respectives et les positions connues à l'avance de la caméra, en fonction des paramètres de
20 prise d'image de celle-ci. Parfois, on identifie un réseau de points de l'environnement, qui ont été illuminés par un laser ou un projecteur d'un faisceau de rayons ; une lumière additionnelle peut être ajoutée pour mieux éclairer les alentours du réseau de points
25 et le faire ressortir du reste de l'environnement. L'utilisation d'un moyen d'illumination rappelle les procédés de télémétrie et entraîne des inconvénients analogues d'imprécision et d'insécurité, qui ne compensent pas toujours la rapidité et la facilité de
30 l'identification et des calculs qu'on peut souvent atteindre.

Dans d'autres méthodes, les points à mesurer sont des sources lumineuses, des marques réfléchissantes ou colorées posées auparavant dans l'environnement. Ces méthodes donnent de bons résultats si les marques et leur position sont convenablement choisies, mais elles ne sont pas applicables dans tous les cas et notamment pour des environnements compliqués et de grande taille : elles semblent surtout intéressantes pour suivre la position d'un objet déterminé et mobile dans l'environnement plutôt que pour mesurer l'environnement lui-même.

Enfin, d'autres procédés optiques sont fondés sur l'absence de marques dans l'environnement et sur le mesurage de certains points d'intérêt des images. Les points d'intérêt sont choisis automatiquement ou par l'opérateur dans le cas de procédés interactifs. Ces procédés ont l'avantage d'être universels ou applicables théoriquement à n'importe quel environnement, mais il n'est pas toujours facile de disposer de points d'intérêt suffisamment nombreux, et qui soient communs à toutes les images ; l'étape d'appariement des points homologues sur des images différentes peut être délicate ; de plus, une description d'un environnement par des points même nombreux est peu évocatrice.

L'invention constitue un procédé faisant partie des méthodes purement optiques et plus précisément de celles qui comportent une analyse d'image. Ce nouveau procédé peut comporter des triangulations, mais il se distingue fondamentalement des procédés précédents en ce qu'on s'intéresse ici à

distinguer des détails de l'environnement plutôt qu'à dresser une cartographie de ses points. Il est en effet souvent plus facile et fructueux de discerner un élément précis de l'environnement et de le distinguer du reste, que de disposer d'une connaissance complète mais indistincte de cet environnement. Dans le cas, fréquent en pratique, de mesurage de locaux industriels, cette considération sera d'autant plus importante que les éléments et obstacles sont souvent nombreux mais de forme simple, de sorte qu'ils se superposent et créent un relief très compliqué, mais que l'exploitation de la représentation faite est beaucoup plus facile quand on a distingué ces éléments et qu'on les a caractérisés par quelques paramètres de position et de forme.

Les avantages offerts par le procédé sont multiples : il n'est point besoin de garnir l'environnement de marques spécifiques ; une portion beaucoup plus importante de l'information des images est exploitée que si on s'occupe de points d'intérêt, ce qui doit donner une précision meilleure de la représentation qu'on obtient ; le procédé est efficace même avec des surfaces variées, diffusantes ou réfléchissantes ; il est applicable à des volumes variés, éventuellement très grands ; la durée d'acquisition est extrêmement rapide, de quelques dizaines de millisecondes ; une automatisation complète du procédé est possible ; la représentation peut être parachevée ultérieurement en y ajoutant de nouvelles entités, qui avaient été négligées auparavant, ou la corrigeant par des mises à jour ou d'autres

opérations ; et comme elle fournit immédiatement un modèle concret de l'environnement, elle peut être exploitée immédiatement, alors qu'une cartographie de points nécessite d'être interprétée.

5 Le procédé est fondé sur un système composé de cinq modules principaux dont voici la liste :

- un module de traitement d'images qui assure la localisation précise des contours naturels des objets à reconstruire ;
- 10 - un module de reconstruction et localisation qui détermine les paramètres géométriques des objets et la situation du système de capture d'images ;
- un module d'identification qui réalise la recherche automatique des contours naturels des objets déjà
- 15 reconstruits ;
- un module d'appariement de points d'intérêt, pour aider à replacer ces contours d'objets reconstruits sur une nouvelle image ;
- et un module de reconstruction en bloc, faisant un
- 20 calcul d'ensemble (récapitulatif) d'après toutes les informations disponibles et améliorant grandement la précision.

La mise en œuvre de ce procédé nécessite une ou plusieurs vidéo-caméras étalonnées au préalable

25 (quoique l'étalonnage ne soit pas nécessaire si on se limite à des primitives de type ponctuel), afin de disposer de la relation entre tout point de l'image et la position du rayon lumineux associé. Les étalonnages préalables ont déjà été décrits par différents

30 auteurs ; on peut citer l'article de Viala, Chevillot, Guérin et Lavest : « Mise en œuvre d'un procédé

d'étalonnage précis de caméra CCD » présenté au 11^{ème} congrès Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle (Clermont-Ferrand, 20 au 22 janvier 1998). Quand plusieurs caméras sont employées, on parle d'un

5 système stéréoscopique apte à donner automatiquement un modèle tridimensionnel de l'environnement par une recherche de points homologues sur les images et des triangulations. Si une seule caméra est employée, le même résultat peut être obtenu par des images

10 successives en déplaçant la caméra d'une quantité déterminée. Cette quantité peut également être déterminée, a posteriori, par calcul si on dispose dans l'environnement d'un mètre étalon.

Pour résumer, l'invention est relative à un

15 procédé de mesurage d'objets tridimensionnels d'un environnement tridimensionnel, consistant à prendre au moins une image par au moins une caméra et à créer une représentation de l'environnement d'après une analyse de l'image, caractérisé en ce que l'analyse comprend

20 une détection de discontinuités d'aspect de l'image, une association des discontinuités détectées à des contours géométriques définis sur l'image par des paramètres, un ajustement des contours aux discontinuités en faisant varier les paramètres, une

25 estimation de forme et de position dans l'environnement d'objets géométriques se projetant sur l'image d'après lesdits contours, la représentation comprenant lesdits objets.

La représentation de l'environnement est

30 complétée à chaque nouvelle image prise ou par des informations supplémentaires. Le procédé peut ainsi

comprendre des estimations initiales de position des objets ou de la caméra à partir d'informations spécifiées manuellement ou à travers un fichier informatique de description.

5 D'une manière générale, le procédé peut être accompli avec bien des variantes, et de la souplesse selon la situation rencontrée. Une possibilité offerte par certaines des meilleures réalisations est une correction de position des objets
10 en estimant les positions de projection des objets sur les images d'après les position respectives de la caméra quand les images furent prises, et en ajustant les positions de projection estimées d'après les positions de projection mesurées sur les images.

15 Cette correction est généralement faite au cours d'un calcul final récapitulatif où l'erreur totale de la représentation est estimée puis minimisée ; on peut aussi rectifier l'estimation des paramètre des caméras.

20 On passe maintenant à la description d'une réalisation concrète de l'invention au moyen des figures suivantes :

- la figure 1A est un schéma d'un système d'examen dans un environnement typique ;
- 25 ▪ la figure 1B illustre comment l'environnement est perçu sur une image ;
- la figure 2 schématise les modules de traitement du système d'examen ;
- les figures 3, 4, 5 et 6 illustrent des
30 modélisations de contours ;

- et les figures 7 et 8 explicitent certaines notations utilisées dans la description.

Les modules énumérés ci-dessus portent les références 20 à 24 sur la figure 2 ; ils seront
5 maintenant décrits successivement d'après l'exemple de la figure 1A, où l'environnement à reconnaître comprend un tuyau 1 doublement coudé en 2 et 3 et finissant sur une ouverture 4, une caisse 5 et une lampe 6. L'appareil de visualisation, appelé capteur 7, comprend
10 deux vidéo-caméras 8 et 9 montées rigidement (quoique de façon réglable si nécessaire) sur un support commun 10 et reliées à un système d'exploitation 11 qui comprend en particulier une mémoire 12 où les images des caméras 8 et 9 sont conservées et une unité de
15 traitement 13. Le procédé conforme à l'invention consiste à exploiter les images les unes après les autres en créant une représentation de l'environnement qu'on complète et précise en exploitant chaque nouvelle image. Ce travail est pour l'essentiel automatique,
20 quoiqu'un opérateur doive encore, en pratique, appliquer son jugement pour compléter ou corriger la représentation dans certaines circonstances.

Nous entendons par représentation de l'environnement la mesure de caractéristiques
25 géométriques ou dimensionnelles d'un ou plusieurs objets, la mesure de caractéristiques géométriques ou dimensionnelles d'éléments ou d'objets constituant une scène ou un environnement. Ce terme se rapportera également à la mesure de la position et de
30 l'orientation d'un ou plusieurs objets.

Une image de caméra consiste en un réseau de points ayant des niveaux de gris différents, qui sont convertis en valeurs numériques pour la conservation dans la mémoire 12. La figure 1B montre que les contours du tuyau 1, de son ouverture 4, de la caisse 5 et de la lampe 6 peuvent être représentés respectivement par trois paires de segments (appelés ici limbes) parallèles ou sensiblement 14, 15 et 16, une ellipse 17, neuf segments de droite 18, et un point 19. En pratique, ces contours séparent des portions de teintes différentes sur l'image et sont donc des discontinuités, ce qu'on exploite pour les mesurer ; c'est la tâche du module de localisation 20.

La localisation des contours naturels sur une image s'appuie sur des modèles dits déformables ou contours actifs (cf. l'article de Kass, Witkin et Terzopoulos : « Snake : Active contour models » dans International Journal of Computer Vision, 1(4), p.321 à 331, janvier 1988 et la thèse de Bascle à l'université de Nice-Sophia Antipolis (janvier 1994) « Contributions et applications des modèles déformables en vision par ordinateur »). Ils consistent à faire évoluer numériquement à partir d'une position initiale un modèle déformable de contour tout en calculant son énergie après chaque déformation. Cette énergie comporte traditionnellement deux termes dont le premier exprime la régularité géométrique du modèle et rend compte de propriétés physiques éventuelles et le second rend compte de l'adéquation entre le modèle et l'image expérimentale obtenue. Concrètement, ce traitement a pour but de régulariser le modèle en réduisant ses

irrégularités locales, généralement imputables au bruit, sans trop s'écarter des informations de l'image ; mais il ne fonctionne bien que sur des images peu complexes, ce qui n'est pas le cas ici. De plus, on propose ici une amélioration en décrivant certains éléments de l'image par des paramètres géométriques globaux. On pourra donc dire que les modèles de l'environnement qu'on obtiendra seront à la fois déformables et paramétriques.

Les contours auxquels on s'intéresse ici ont des formes simples et appartiennent à quelques types privilégiés qu'on rencontre très fréquemment dans la réalité : ce sont, comme on l'illustre à la figure 1B, avant tout le point, la droite, la double droite et l'ellipse. Un point sera modélisé par ses coordonnées cartésiennes x et y sur l'image. Comme les images sont finies, les droites seront modélisées par des segments et leurs paramètres sur l'image seront au nombre de quatre : les coordonnées x_0 et y_0 du milieu du segment, la longueur L du segment et l'angle θ qu'il forme avec l'horizontale sur l'image, comme le résume la figure 3. Tout point du segment obéira aux équations

$$(1) \quad \begin{cases} x = x_0 + u \frac{L}{2} \cos \theta \\ y = y_0 + u \frac{L}{2} \sin \theta \end{cases}$$

avec u compris entre -1 et $+1$ et θ compris entre 0 et π .

Un cylindre sera appréhendé par ses contours ou limbes. Il s'agira de deux segments parallèles, sauf si l'on admet l'effet de la perspective. Un modèle convenable est résumé par la

figure 4 et comprend cinq paramètres : les coordonnées x_0 et y_0 de l'isobarycentre du système formé par les deux segments, la longueur commune L des deux segments, l'angle θ formé par les deux segments avec l'horizontale et la distance d séparant les deux segments. Les coordonnées des points des deux segments sont données par les équations

$$(2) \begin{cases} x = x_0 + u \frac{L}{2} \cos(\theta) + \frac{d}{2} \sin(\theta) \\ y = y_0 + u \frac{L}{2} \sin(\theta) - \frac{d}{2} \cos(\theta) \end{cases}$$

$$\text{et } (3) \begin{cases} x = x_0 + u \frac{L}{2} \cos(\theta) - \frac{d}{2} \sin(\theta) \\ y = y_0 + u \frac{L}{2} \sin(\theta) + \frac{d}{2} \cos(\theta) \end{cases}$$

avec u (paramètre de parcours) compris entre -1 et $+1$.

Mais si on veut tenir compte d'un effet de perspective, le modèle précédent peut être enrichi des paramètres $\delta\theta$ exprimant des déviations en sens opposés et convergent des deux segments, comme l'exprime la figure 5 ; les points sélectionnés par l'opérateur sont alors au nombre de 4. Les équations

$$(4) \begin{cases} x = x_0 + u \frac{L}{2} \cos(\theta + \delta\theta) + \frac{d}{2} \sin(\theta) \\ y = y_0 + u \frac{L}{2} \sin(\theta + \delta\theta) - \frac{d}{2} \cos(\theta) \end{cases}$$

$$\text{et } (5) \begin{cases} x = x_0 + u \frac{L}{2} \cos(\theta - \delta\theta) - \frac{d}{2} \sin(\theta) \\ y = y_0 + u \frac{L}{2} \sin(\theta - \delta\theta) + \frac{d}{2} \cos(\theta) \end{cases}$$

remplaceront les équations (2) et (3).

La projection d'un cercle dans l'espace sur une image bidimensionnelle est une ellipse dont un paramétrage possible peut être lu sur la figure 6 : les paramètres sont les coordonnées x_0 et y_0 du centre, les

longueurs l_1 et l_2 de grand et de petit axe et l'orientation θ du grand axe par rapport à l'horizontale. Les équations

$$(6) \begin{cases} x = x_0 + l_1 \cos(\theta) \cos(u) - l_2 \sin(\theta) \sin(u) \\ y = y_0 + l_1 \sin(\theta) \cos(u) + l_2 \cos(\theta) \sin(u) \end{cases}$$

5 donnent les coordonnées des points de l'ellipse, où u est un paramètre d'abscisse curviligne compris entre 0 et 2π .

Le procédé commence par une initialisation de la représentation de l'environnement, en général
10 manuelle, où un opérateur examine une des images sur un écran d'ordinateur et repère des contours à modéliser. Après avoir choisi le type de contour adapté, il vise sur l'écran un nombre suffisant de points pour définir ce contour et permettre un premier calcul des
15 paramètres.

Ces points sont figurés par des étoiles sur les figures 3 et 4 : il s'agit des extrémités du segment, et des extrémités d'un limbe de cylindre et d'un point de l'autre limbe. Une ellipse est définie
20 par cinq points.

L'étape suivante est une adéquation du contour sélectionné par l'opérateur ou automatiquement à l'image grâce à une fonction de potentiel au moyen de calculs faits par le module de localisation 20. En
25 général, l'amélioration d'un modèle sur une image est chiffrée par la diminution successive d'une fonction P_e dite de potentiel qui comprend plusieurs termes. Un seul terme d'énergie suffit ici dans la plupart des cas. L'image est traitée en calculant les différences
30 de niveaux de gris numérisés de points voisins, pour

associer à chacun des points de l'image une intensité de potentiel élevée si le point est dans une zone de teinte uniforme, et une intensité de potentiel faible s'il est dans une zone de transition ou de discontinuité de teinte. Si une image de potentiel était représentée, elle présenterait des zones foncées aux contours des objets et, en général, un fond clair ailleurs. La somme du potentiel d'un contour est calculée sur tous ses points, puis un algorithme d'analyse numérique par descente de gradient est mis en œuvre pour calculer les variations du potentiel en fonction de la variation des paramètres du contour. Dans le cas présent, c'est plutôt la somme quadratique ε du potentiel P_e le long du contour C qu'on cherche à minimiser selon l'équation

$$(7) \quad \varepsilon_{\min}(a) = \left\| \sum_{x,y \in C} P_e(x(a), y(a)) \right\|^2,$$

où a est le vecteur des paramètres du modèle et x, y sont les abscisses et les ordonnées des points du contour. Outre sa rapidité de convergence, cet outil numérique présente l'avantage de fournir une évaluation de la matrice de covariance sur le modèle estimé, noté Δ_a . Cette information sera exploitée par le module de reconstruction et de localisation tridimensionnelles.

On utilise une distance spéciale donnée par l'équation

$$(8) \quad f(d) = 1 - e^{\left(\frac{d^2}{2\sigma^2}\right)}$$

pour calculer le potentiel P_e des points de l'image. Cette distance spéciale possède les avantages d'être quadratique au voisinage de zéro, c'est-à-dire du

contour, et d'être à peu près constante lorsque la distance euclidienne entre points de l'image d devient importante. σ est un coefficient fixe. Cette distance est comparable à un coefficient de pondération qui
5 atténue l'influence des points éloignés dans le calcul du potentiel P_e .

Cependant, un terme de potentiel supplémentaire est utilisé en sus du terme P_e précédent pour les contours de cylindre. En effet, il est
10 fréquent que ces éléments soient soumis à des variations d'éclairage qui y créent des bandes très réfléchissantes de spécularités vers lesquelles le modèle déformable pourrait converger en les confondant avec des contours. L'utilisation de ce terme
15 supplémentaire prévient ce danger : il s'agit d'un terme de potentiel conventionnellement très élevé pour les points fortement éclairés ; le potentiel total ainsi modifié devient élevé autour des bandes réfléchissantes, ce qui repousse les contours modélisés
20 vers les contours réels du cylindre.

Il faut encore signaler l'influence des aberrations géométriques introduites par les lentilles d'un objectif : une droite dans l'espace se projette en segment de courbe, plutôt qu'en segment rectiligne, sur
25 l'image. Les modèles déformables opposés ici ne permettent pas d'approcher parfaitement de telles parties déformées, mais on peut utiliser un procédé de correction des aberrations géométriques pour appliquer le procédé de l'invention à des images rectifiées,
30 obtenues sans distorsion. Ce procédé de correction est fait pour tous les points de l'image à la fois au

préalable, et c'est l'image rectifiée qui est conservée dans la mémoire 12.

Les aberrations géométriques sont composées de deux termes, dont un terme de distorsion radiale qui déplace un point radialement par rapport au centre optique de l'image et s'exprime comme un polynôme d'équation

$$(9) \quad \delta_r(r) = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7$$

en fonction de la distance radiale $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; et un terme de distorsion tangentielle qui intègre une composante tangentielle et une composante radiale conformément aux équations

$$(10) \quad \begin{cases} \delta_t(x) = P_1(r^2 + 2x) + 2P_2xy \\ \delta_t(y) = P_2(r^2 + 2y) + 2P_1xy \end{cases}$$

Les coefficients K_1 , K_2 , K_3 et P_1 et P_2 sont des coefficients de distorsion estimés pendant l'étalonnage de la caméra.

La distorsion radiale est estimée par un calcul préliminaire d'une table d'aberration en fonction de la distance radiale. Cette table fait correspondre, pour chaque distance radiale r_D du centre d'une image d'étalonnage distordue, la distance correspondante r_{ND} d'un même endroit dans l'image non distordue. L'écartement entre les valeurs successives des distances r_D logées dans la table est choisi pour que la précision minimale Δ entre des valeurs successives de la distance corrigée r_{ND} soit respectée. Ce procédé permet d'obtenir une précision qui peut atteindre un dixième du pas entre deux points successifs de l'image.

On ne prévoit pas de procéder de la même façon pour tenir compte de la distorsion tangentielle, car les tables donnant des corrections en fonction des coordonnées x et y devraient concerner tous les points de l'image et occuperaient une place excessive en mémoire. C'est pourquoi, s'il faut tenir compte de ces distorsions tangentielles, il est conseillé d'utiliser un algorithme de recherche de racine d'équation fondée sur les équations (10), tel que l'algorithme de Powell bien connu dans l'art.

On passe maintenant à la description du deuxième module 21 du système d'exploitation, qui est un module de reconstruction et de localisation qui exploite les positions des contours d'objets détectés précédemment sur les images pour estimer la position de ces objets dans l'environnement, c'est-à-dire construire la représentation tridimensionnelle de celui-ci, tout en calculant la position du capteur 7 d'image par une étape de localisation. Le procédé est récurrent, c'est-à-dire que les images sont exploitées successivement, la représentation de l'environnement étant à chaque fois complétée et corrigée pour la rendre plus précise. Il s'agit d'une application du filtre de Kalman. On décrit ici l'utilisation d'un capteur 7 stéréoscopique à deux caméras, mais le procédé serait applicable à un capteur à caméra unique : la reconstruction et la localisation ne pourraient être appréciées qu'à un facteur d'échelle près, qu'on pourrait donner en injectant une information supplémentaire dans le système, telle

qu'une distance entre deux points ou le rayon d'un cylindre.

Nous donnons ci-dessus les formules qui lient, pour une caméra d'indice i du capteur ayant pris une image à l'instant k , le vecteur x_k des paramètres de l'objet détecté dans un repère absolu et le vecteur z_k^i de ses coordonnées d'observations dans cette image. La caméra aura sa position notée par une matrice de rotation R_k^i et un vecteur de translation t_k^i dans le repère absolu. Les formules de passage sont notées par la lettre h .

Dans le cas d'un point, les équations

$$(11) \quad h_p^i(x_k, z_k^i) = \begin{pmatrix} u - f \frac{x_k}{z_k} \\ v - f \frac{y_k}{z_k} \end{pmatrix} = 0$$

où $(x_k, y_k, z_k)^T = R_k^i(x, y, z)^T + t_k^i$ sont respectées, avec $x_k = (x, y, z)^T$, $z_k^i = (u, v)$.

Dans le cas d'une droite, x_k et z_k^i sont définis par les vecteurs (13) $x_k = (x, y, z, \beta, \varphi)^T$, $z_k^i = (u, v, \theta)$, où β et φ sont les coordonnées sphériques du vecteur directeur de la droite et θ l'angle que sa projection fait sur l'image ; les formules

$$(14) \quad h_d^i(x_k, z_k^i) = \begin{pmatrix} (m_i - m_p) \times v_i \\ v_i \cdot (m_k \times v_k) \end{pmatrix} = 0$$

où \times est le produit vectoriel, donnent les conditions à satisfaire, où (m_k, v_k) sont les paramètres de la droite (les coordonnées d'un de ses points m_k et de son vecteur directeur) conformément aux équations

$$(15) \quad m_k = R_k^i m + t_k^i, \quad v_k = R_k^i v,$$

m_p représente les coordonnées de la projection du point m_k sur l'image, m_i est le milieu du segment détecté sur l'image et v_i est le vecteur directeur du segment, conformément à la figure 7, et m_i et v_i sont déduits de z_k .

Un cylindre infini est défini par le vecteur

$$(16) \quad x_k = (x, y, z, \beta, \phi, r)^t,$$

où x , y et z sont les coordonnées (notées m) d'un point de son axe, β et ϕ sont les coordonnées sphériques (notées v) du vecteur directeur de son axe, et r est son rayon. Les équations

$$(17) \quad m_k = R_k^i m + t_k^i \quad \text{et} \quad v_k = R_k^i v$$

expriment la position de l'axe du cylindre dans le repère de la caméra i à l'instant k . On calcule en outre (m_1, v_1) et (m_2, v_2) , les coordonnées de ses limbes, et m_{p1} et m_{p2} les projections de points m_1 et m_2 des limbes sur l'image. A partir des paramètres mesurés sur l'image

$$(18) \quad (u, v, \theta, \delta\theta, d),$$

on déduit le vecteur d'observation $z_k = (u_1, v_1, \theta_1, u_2, v_2, \theta_2)$ correspondant aux points milieux et aux orientations des deux limbes observés et on obtient l'équation de mesure

$$(19) \quad k_{xy}(x_k, z_k) = \begin{pmatrix} (m_{11} - m_{12}) \times v_{11} \\ v_{11} \cdot (m_{12} \times v_1) \\ (m_{12} - m_{11}) \times v_{12} \\ v_{12} \cdot (m_{11} \times v_2) \end{pmatrix} = 0.$$

La figure 8 représente ces paramètres. Conformément au cas de la droite, v_{11} et m_{11} , v_{12} et m_{12} sont déduits de z_k .

Quant au cercle, il est défini par un vecteur d'état conforme à la formule

$$(20) \quad x_k = (x, y, z, \beta, \varphi, r)^t,$$

où x, y et z désignent les coordonnées de son centre, β et φ les coordonnées sphériques du vecteur directeur de sa normale et r son rayon. De plus, les formules

$$(21) \quad m_k = R_k^i m + t_k^i \quad \text{et} \quad v_k = R_k^i v$$

s'appliquent. Si les coordonnées d'observation sont représentées par la fonction

$$(22) \quad z_k^i = (u, v, l_1, l_2, \theta),$$

les équations

$$(23) \quad h_c^i(x_k, z_k^i) = \begin{pmatrix} q_0 - ((b^2(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2 - r^2) + 1 - 2by_k) / Q) \\ q_1 - ((2ab(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2 - r^2 - 2bx_k - 2ay_k) / Q)) \\ q_2 - ((2ad(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2 - r^2) - 2cx_k - 2az_k) / Q) \\ q_3 - ((2bd(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2 - r^2) - 2cy_k - 2bz_k) / Q) \\ q_4 - ((c^2(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2 - r^2) + 1 - 2cz_k) / Q) \end{pmatrix} = 0$$

avec $Q = a^2(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2 - r^2) + 1 - 2bx_k$ expriment le passage entre le vecteur d'état et les observations, où q_0, \dots, q_4 sont issus d'une conversion des paramètres (22) pour obtenir une représentation de l'ellipse sous forme implicite telle que $u^2 + q_0 v^2 + q_1 uv + q_2 u + q_3 v + q_4 = 0$.

Nous passons maintenant à la description du procédé de reconstruction dans le cas particulier d'un capteur formé de deux caméras fixes l'une par rapport à l'autre, notées par leurs indices l et r et prenant simultanément une image. Pour un point, le vecteur d'observation global peut s'exprimer par

$$(24) \quad z_k = (u^l, v^l, u^r, v^r, \chi_k, \beta_k, \alpha_k, t_{xk}, t_{yk}, t_{zk})$$

où u^l, v^l, u^r et v^r sont les coordonnées du point sur les deux images et les autres paramètres sont les vecteurs d'orientation et de translation du capteur

dans le repère absolu. La fonction d'observation du point est alors donnée par l'équation

$$(25) \quad h_p(x_k, z_k) = \begin{pmatrix} h_p^1(x_k, z_k^1) \\ h_p^r(x_k, z_k^r) \end{pmatrix} = 0,$$

dont la solution (dont on aura remarqué qu'il s'agit de
5 duplication de l'équation (11) pour les deux caméras)
donne une évaluation du vecteur d'état x_k du point,
composé des coordonnées x , y et z dans le repère
absolu.

La localisation d'une droite est
10 conditionnée par l'obtention d'un vecteur d'observation

$$(26) \quad z_k = (u^1, v^1, \theta^1, u^r, v^r, \theta^r, \chi_k, \beta_k, \alpha_k, t_{xk}, t_{yk}, t_{zk})^t$$

et la résolution des équations

$$(27) \quad h_d(x_k, z_k) = \begin{pmatrix} h_d^1(x_k, z_k^1) \\ h_d^r(x_k, z_k^r) \end{pmatrix} = 0,$$

de façon analogue ; rappelons que les paramètres θ sont
15 les angles des projections de la droite sur les images
l et r par rapport à l'horizontale. Il faut toutefois
noter que, comme on observe des segments de droite
plutôt que des droites elles-mêmes, le vecteur d'état
d'une droite est donné par la formule

$$20 \quad (28) \quad x_k = (a, b, p, q)^t,$$

plutôt que par les coordonnées d'un point de la droite
et le vecteur directeur de cette droite. A chaque
acquisition, la droite estimée par les paramètres du
vecteur d'état a , b , p et q est exprimée sous forme
25 d'une droite finie de paramètres x , y , z , β , ϕ et l où
la longueur du segment est désignée par l et le milieu
de ce segment par les coordonnées x , y et z . Ces
dernières coordonnées sont évaluées par une

reprojection dans l'image. La définition des paramètres a, b, p, q peut être donnée ci-dessous :

- la droite a un vecteur directeur $(1, a, b,)$ et un vecteur de position $(0, p, q)$ sauf si elle est perpendiculaire à l'axe O_x ;
- elle peut être définie par le vecteur directeur $(a, 1, b)$ et un vecteur de position $(p, 0, q)$ sauf si elle est perpendiculaire à l'axe O_y ;
- et par un vecteur directeur $(n, b, 1)$ et un vecteur de position $(p, q, 0)$ sauf si elle est perpendiculaire à l'axe O_z . Une convention de préférence permet de définir une priorité quand plusieurs de ces représentations sont possibles.

En ce qui concerne le cylindre, il est encore défini dans la représentation par des paramètres $a, b, p,$ et q de son axe, et par son rayon, selon la formule

$$(29) \quad x_k = (a, b, p, q, r)^t.$$

Le vecteur d'observation est défini par la formule

$$(30) \quad z_k = (u_1^i, v_1^i, \theta_1^i, u_2^i, v_2^i, \theta_2^i, u_1^r, v_1^r, \theta_1^r, u_2^r, v_2^r, \theta_2^r, \chi_k, \beta_k, \alpha_k, t_{x_k}, t_{y_k}, t_{z_k})^f.$$

Le système

$$(31) \quad h_{cy}(x_k, z_k) = \begin{pmatrix} h_{cy}^i(x_k, z_k^i) \\ h_{cy}^r(x_k, z_k^r) \end{pmatrix} = 0$$

doit être résolu. Enfin, le cercle à vecteur d'état défini par la formule

$$(32) \quad x_k = (x, y, z, \beta, \phi, r)^t,$$

le vecteur d'observation défini par la formule

$$(33) \quad z_k = (u^i, v^i, l_1^i, l_2^i, \theta^i, u^r, v^r, l_1^r, l_2^r, \theta^r, \alpha_k, \beta_k, \chi_k, t_{x_k}, t_{y_k}, t_{z_k})^f,$$

et le système

$$(34) \quad h_{cy}(x_k, z_k) = \begin{pmatrix} h_{cy}^1(x_k, z_k^1) \\ h_{cy}^r(x_k, z_k^r) \end{pmatrix} = 0$$

doit être résolu.

A chaque nouvelle acquisition, l'estimation de la position de l'objet est affinée. Quand un objet apparaît pour la première fois dans un couple d'images, cette estimation est initialisée par une reconstruction préliminaire par triangulation. Des méthodes ont été proposées dans l'art. Une initialisation convenable permet de faire converger l'estimation de position de l'objet rapidement à chaque nouvelle image.

La reconstruction de l'environnement tridimensionnel implique une localisation du capteur, dont la position n'est en général pas connue, ou n'est connue qu'avec une précision insuffisante. A chaque nouvelle acquisition, on utilise les points déjà reconstruits dans l'environnement et leur vecteur d'observation pour effectuer une pré-localisation du capteur en recherchant

$$(36) \quad \min(\chi_k, \beta_k, \alpha_k, t_x, t_y, t_z) = \sum_j \|h_j^i(x_k, z_k^j)\|^2,$$

c'est-à-dire les valeurs $\chi_k, \beta_k, \alpha_k, t_{xk}, t_{yk}, t_{zk}$ qui donnent la meilleure concordance entre la représentation de l'environnement et son image sur les caméras (h proche de 0), pour tous les points j du modèle. Ensuite, on résout de manière récurrente les équations

$$(37) \quad h_p(x_k, z_k) = 0, \quad h_d(x_k, z_k) = 0, \quad h_{cy}(x_k, z_k) = 0, \\ \text{ou } h_c(x_k, z_k) = 0$$

(une par objet déjà reconstitué, selon la catégorie de l'objet), où les vecteurs d'observations z_k sont donnés par la formule

$$(38) \quad z_k = (u^1, v^1, u^r, v^r, x, y, z)^t,$$

$$5 \quad z_k = (u^1, v^1, \theta^1, u^r, v^r, \theta^r, x, y, z, \beta, \phi)^t,$$

$$z_k = (u_1^1, v_1^1, \theta_1^1, u_2^1, v_2^1, \theta_2^1, u_1^r, v_1^r, \theta_1^r, u_2^r, v_2^r, \theta_2^r, x, y, z, \beta, \phi, r)^t,$$

$$\text{ou } z_k = (u^1, v^1, l_1^1, l_2^1, \theta^1, u^r, v^r, l_1^r, l_2^r, \theta^r, x, y, z, \beta, \phi, r)^t$$

appropriée : il s'agit d'une autre application du filtre de Kalman où le vecteur d'état estimé est dans ce cas $(\chi_k, \beta_k, \alpha_k, t_{xk}, t_{yk}, t_{zk})$. Le module 22 effectue cette localisation.

Le module d'identification 23 du système permet d'identifier automatiquement au moins une partie des contours qui font l'objet des calculs précédents, à chaque fois qu'une image est prise. On propose d'agir de la façon suivante :

- sélectionner une image précédente k_0 , de préférence proche de l'image actuelle k en ce qui concerne les positions et orientations de prise de vue ;
- 20 - sélectionner des points d'intérêt I_0 sur cette image précédente k_0 , ce qui peut être fait automatiquement, les points d'intérêt ayant comme propriété générale de présenter un gradient important de luminosité à leur voisinage, peu sensible en général aux changements de conditions de prise de vue (éclairage, zoom, exposition de la vue). Un point caractéristique déjà identifié à une image k_0 sera donc le plus souvent identifié de nouveau sur une image suivante k , sauf s'il est
- 30 alors caché par un autre objet de l'environnement ;

- 5 - quand les points d'intérêt I_0 et I_k des deux images ont été trouvés, ils sont mis en correspondance d'une image à l'autre ; on peut utiliser pour cela l'information de luminance au voisinage de chacun d'eux, qui est susceptible de les caractériser au mieux ; elle est codée sous forme vectorielle en utilisant différents filtres. Le module recherche, pour chaque point d'intérêt I_k de la nouvelle image k , celui des points d'intérêt I_0 de l'image précédente k_0 qui lui est le plus similaire en calculant un score de corrélation ou une distance vectorielle (voir par exemple les travaux de C. Schmid « Appariement d'images par invariants locaux de niveaux de gris », Thèse de doctorat INPG, 15 1996) ;
- 20 - quand les correspondances entre couples de points d'intérêt, supposés provenir des projections respectives sur les deux images d'un même point de l'environnement, ont été déterminées, une matrice de correspondance entre les deux images a ainsi été obtenue. Il devient alors possible de projeter le modèle tridimensionnel estimé auparavant sur l'image 25 actuelle au moyen de cette matrice. Les contours ainsi obtenus servent d'estimation préliminaire de contours d'objets pour la nouvelle image k , et ils sont utilisés en appliquant sur eux le procédé explicité plus haut du module 20 en utilisant des modèles déformables. L'opérateur n'a donc pas à recommencer complètement la sélection des contours 30 sur la nouvelle image k . Il peut évidemment rectifier des contours qui apparaîtraient comme

incorrects ou éliminer des contours occultés par d'autres objets de l'environnement. Comme le programme est conçu pour éliminer lui-même les contours occultés par des objets déjà incorporés au modèle, l'opérateur ne devrait éliminer que les contours occultés pour des objets qui n'ont pas encore été identifiés. Il doit cependant introduire les contours apparaissant pour la première fois sur l'image k.

Un dernier module est un calcul tridimensionnel en bloc. Il est accompli par le module 24 quand toutes les images de l'environnement ont été exploitées de la manière qu'on a décrite et qu'une représentation de l'environnement a été complétée. Le calcul est mené de la façon suivante :

- A partir des paramètres R_k^i et t_k^i a priori pour chaque image k, les projections des contours de la représentation sur les plans d'image de la caméra sont calculées ;
- les écarts entre les positions des contours projetés et les positions des mêmes contours évalués auparavant sur les mêmes images sont calculés ;
- les positions des contours dans la représentation sont réévaluées afin de minimiser les écarts.

On procède en utilisant une méthode des moindres carrés en minimisant une erreur globale. Un vecteur $x = (x_{G1} \dots x_{Gn} x_{M1} \dots x_{Mp})^T$ où les x_G regroupent les paramètres de tous les n objets de la représentation et les x_M regroupent les paramètres des p prises de vue $(\alpha, \beta, \chi, t_x, t_y, t_z)^T$ peut être défini,

ainsi qu'un vecteur z de mesure qui regroupe l'ensemble des observations faites pour chaque objet et pour chaque image. L'ajustement effectué par le module 24 revient à la minimisation d'une fonctionnelle d'erreur $F(x, z, a)$ où a comprend des informations connues sur les moyens de prise d'image (par exemple leurs paramètres intrinsèques, centre optique, focale, coefficients d'échelle et de distorsion), ou sur la représentation (par exemple des paramètres du vecteur x qui sont supposés bien déterminés ou connus). Des pondérations des différents paramètres peuvent être introduites. Ce module 24 permet donc d'évaluer les incertitudes de la représentation de l'environnement et de les réduire en modifiant les paramètres estimés de prise de vue.

Il est possible de corriger certains paramètres ou de les bloquer. Les paramètres utilisés sont u et v pour le point, θ et d (distance à l'origine du référentiel d'image) pour la droite et chaque limbe de cylindre. De plus, on utilise encore les coordonnées u et v des extrémités des segments de droite et de cylindre.

Le calcul en bloc est utilisable également pour effectuer la mesure de la position et de l'orientation d'un ou plusieurs objets au moyen d'une seule image et d'une caméra. Il sera nécessaire pour cela de disposer d'informations complémentaires sur les objets : les caractéristiques géométriques de chaque objet doivent être connues et injectées dans le calcul en bloc. La mesure des projections dans une seule image de ces dites caractéristiques est suffisante alors pour déterminer la position et l'orientation de l'objet. Il

sera nécessaire de veiller à disposer de caractéristiques en nombre suffisant pour évaluer tous les paramètres de position et d'orientation.

REVENDICATIONS

1. Procédé de mesurage d'objets tridimensionnels d'un environnement tridimensionnel, consistant à prendre au moins une image par au moins
5 une caméra et à créer une représentation de l'environnement d'après une analyse de l'image, caractérisé en ce que l'analyse comprend une détection de discontinuités d'aspect de l'image, une association des discontinuités détectées à des contours
10 géométriques définis sur l'image par des paramètres, un ajustement des contours aux discontinuités en faisant varier les paramètres, une estimation de forme et de position dans l'environnement d'objets géométriques se projetant sur l'image d'après lesdits contours, la
15 représentation comprenant lesdits objets.

2. Procédé de mesurage selon la revendication 1, caractérisé en ce que les contours géométriques comprennent le point, la ligne droite, l'ellipse, et les objets comprennent le cercle, le
20 cylindre, la droite et le point.

3. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que les paramètres comprennent des coordonnées cartésiennes planes, des angles et des longueurs.

25 4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1, 2 ou 3, caractérisé en ce qu'il comprend, pour détecter les discontinuités d'aspect de l'image, une conversion des images en images de potentiel des points de l'image, les potentiels étant
30 calculés pour avoir une valeur extrême aux discontinuités.

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que le potentiel comprend un terme tenant compte de zones de très faible intensité de niveau de gris des images.

5 6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que l'estimation de position des objets est complétée par une estimation de position de la caméra d'après la représentation de l'environnement et l'image de la
10 caméra.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il comprend des estimations initiales de position des objets ou de la caméra à partir d'informations spécifiées
15 manuellement ou à travers un fichier informatique de description.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce qu'il comprend une répétition des étapes de détection, d'association,
20 d'ajustement et d'estimation pour chacune des images, la représentation de l'environnement étant rectifiée par des corrections de position des objets pour chacune des images.

9. Procédé selon la revendication 8, caractérisée en ce qu'une projection des contours des objets de la représentation de l'environnement est faite sur chaque nouvelle image avant la détection des discontinuités d'aspect de ladite nouvelle image.
25

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que lesdits contours projetés sont ajustés sur les discontinuités d'aspect de l'image.
30

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 8 et 9, caractérisé par des additions de contours géométriques et d'objets géométriques se projetant sur lesdits contours pour certaines au moins
5 des nouvelles images.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé par une correction de position des objets en estimant les positions de projection des objets sur les images d'après les
10 positions respectives de la caméra quand les images furent prises, et en ajustant les positions de projection estimées d'après les positions de projection mesurées sur les images.

15

1 / 5

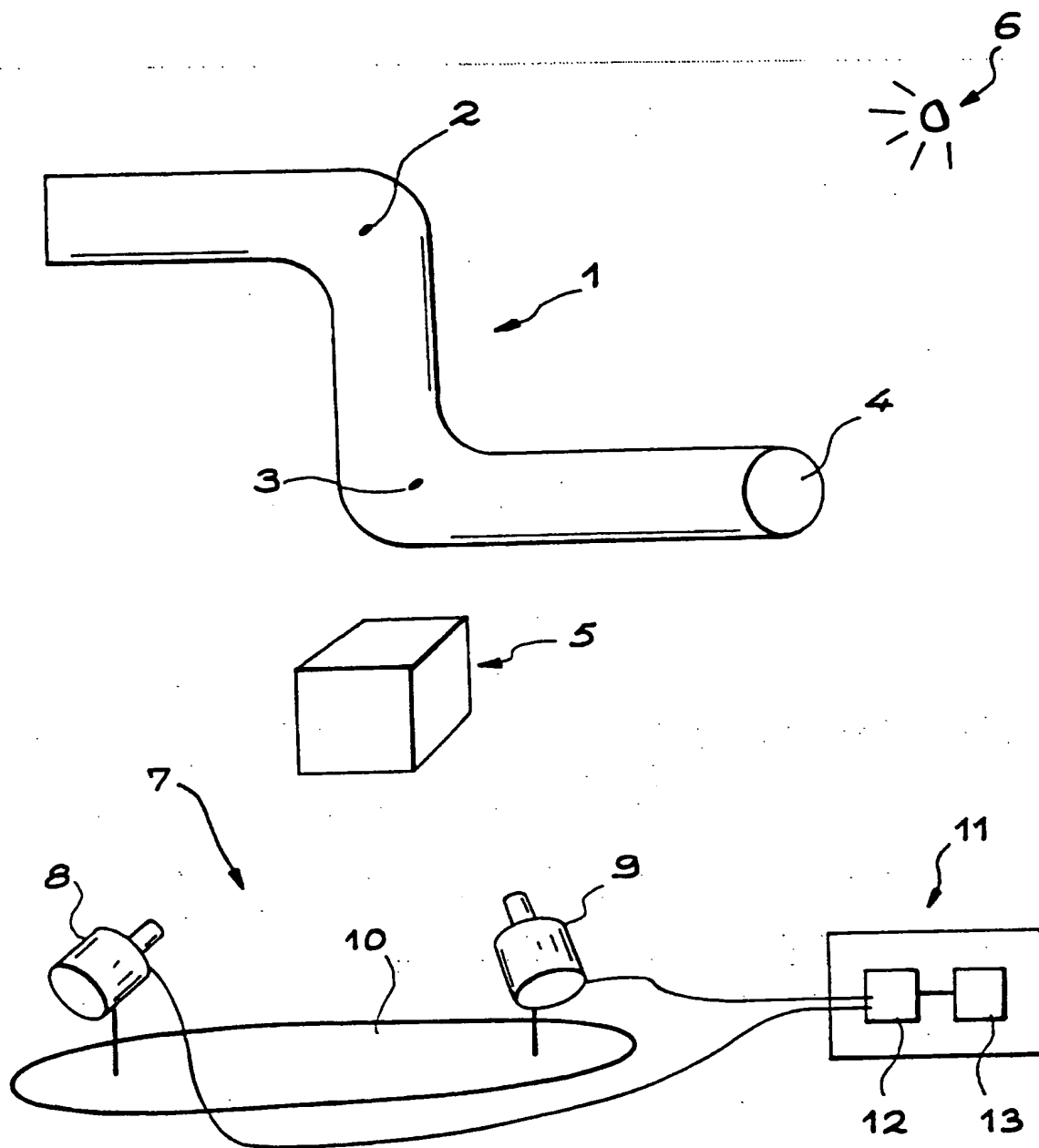


FIG. 1A

2 / 5

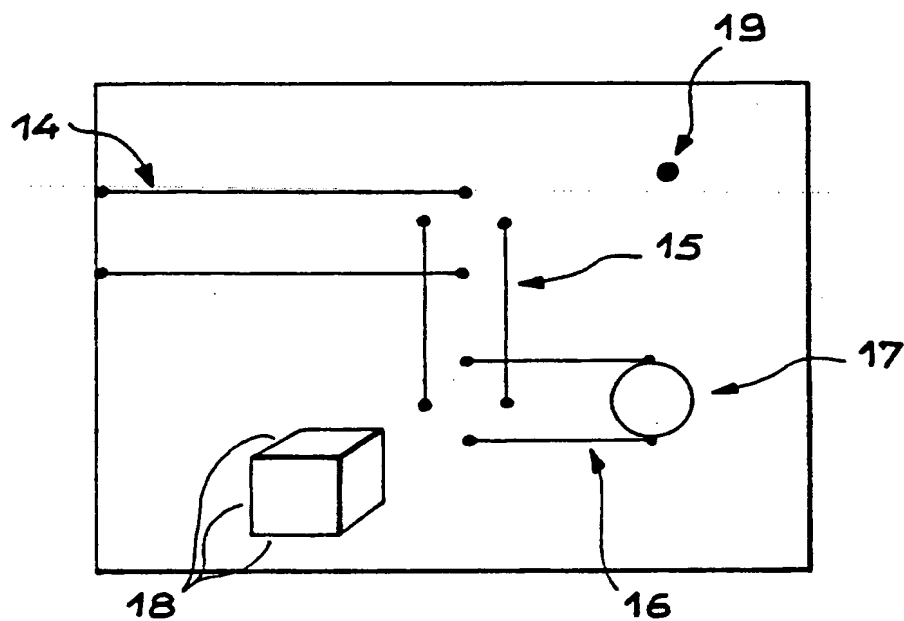


FIG. 1 B

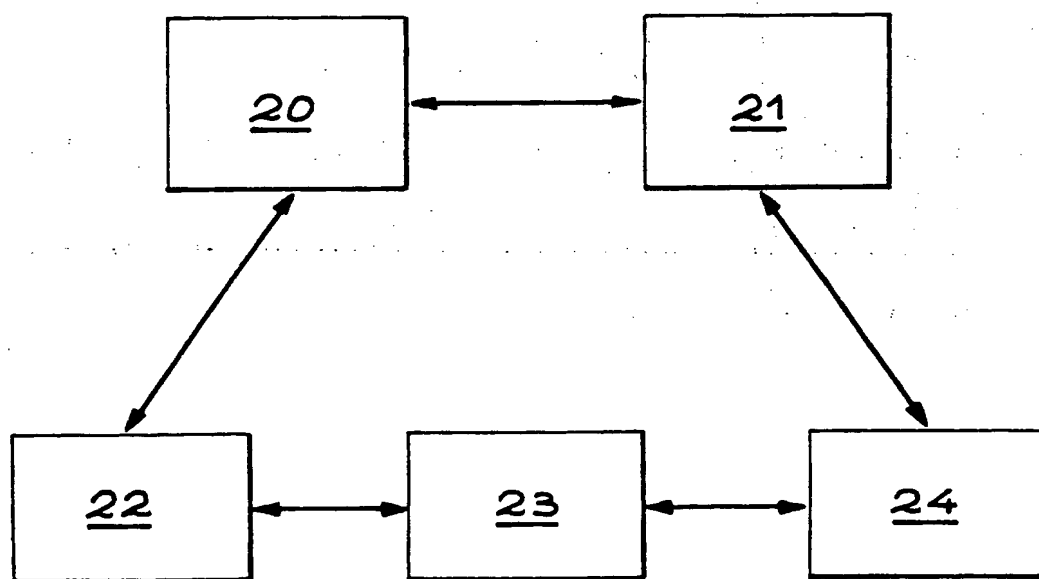


FIG. 2

3 / 5

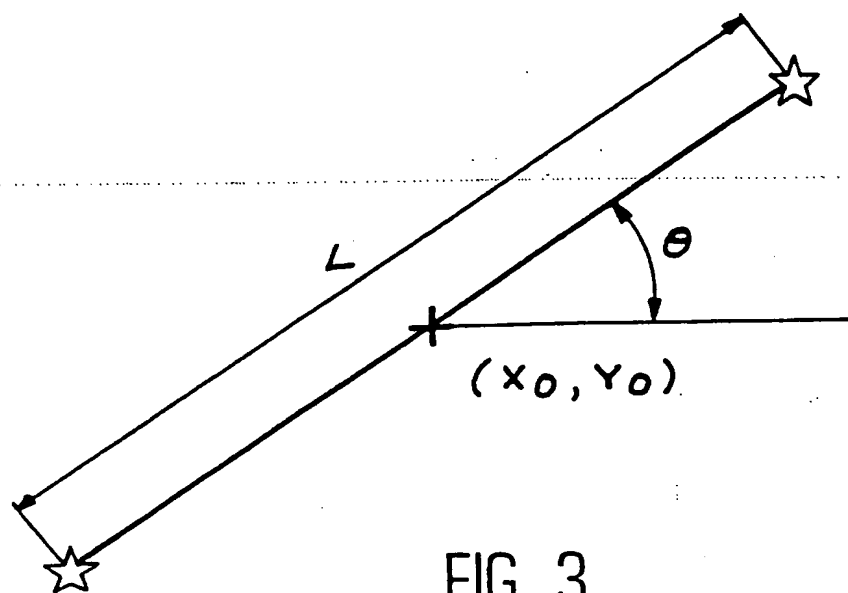


FIG. 3

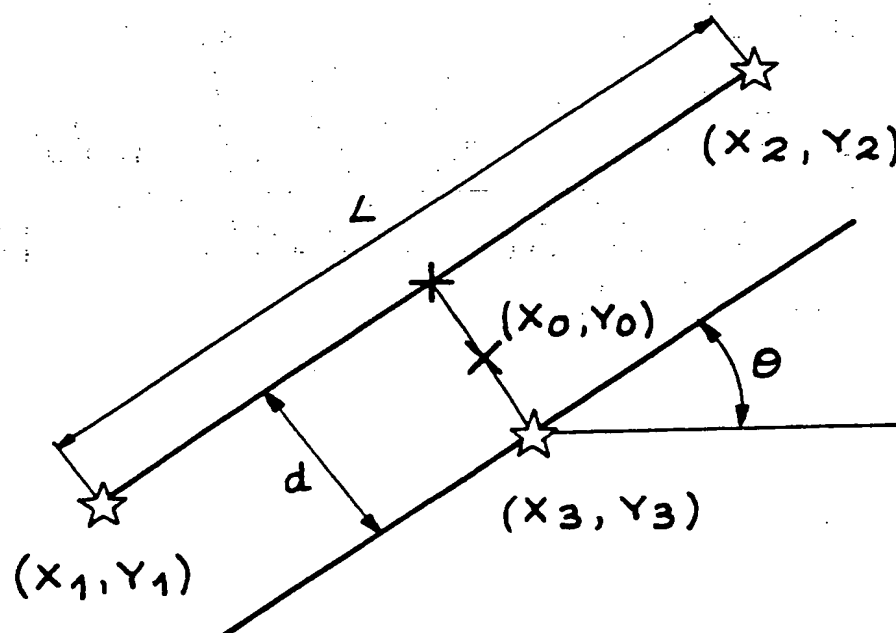


FIG. 4

4 / 5

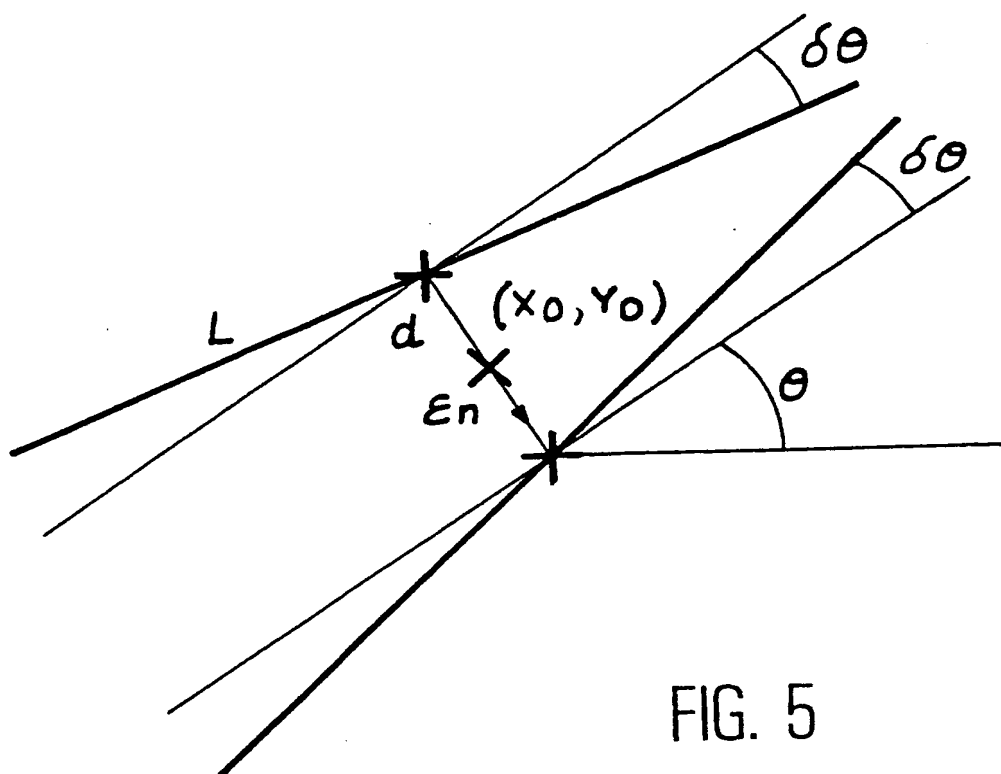


FIG. 5

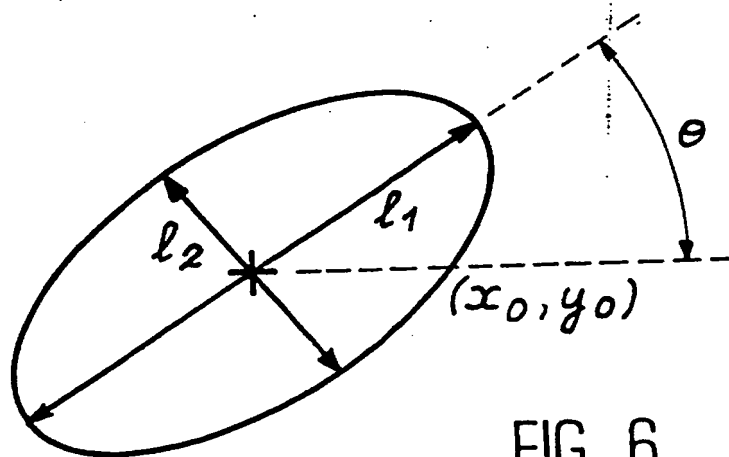
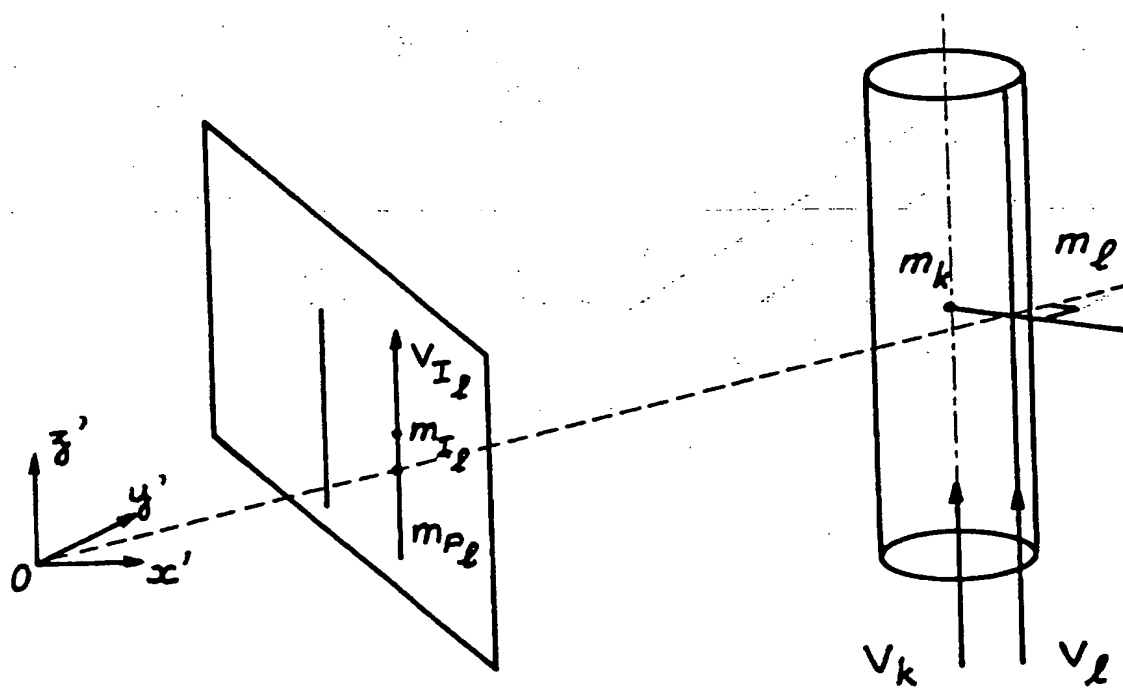
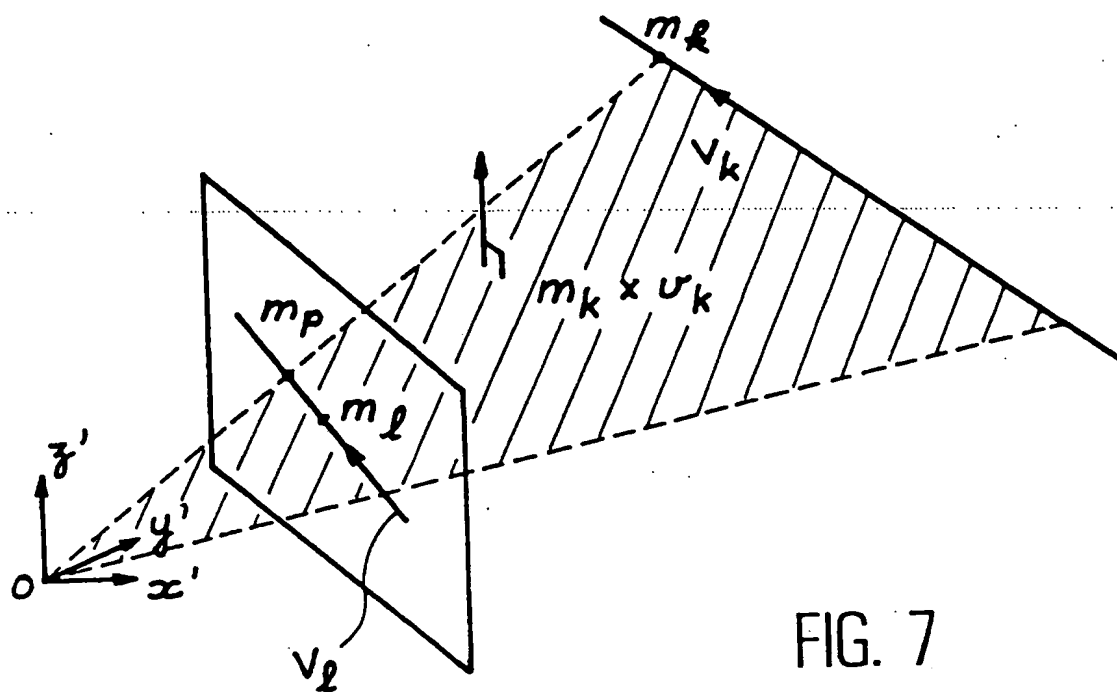


FIG. 6

5 / 5



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

In **ational Application No**
PCT/**01/01274****A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

IPC 7 G01B11/00 G01B11/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01B G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched.

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

WPI Data, PAJ, EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 537 494 A (TOH PENG S) 16 July 1996 (1996-07-16) the whole document	1-12
A	GB 2 272 515 A (ONA ELECTRO EROSION) 18 May 1994 (1994-05-18) the whole document	1
A	DE 43 25 269 A (ZEISS CARL JENA GMBH) 2 February 1995 (1995-02-02) abstract	1

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.*** Special categories of cited documents:*****A*** document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance***E*** earlier document but published on or after the international filing date***L*** document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)***O*** document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means***P*** document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed***T*** later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention***X*** document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone***Y*** document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.***Z*** document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

17 August 2001

Date of mailing of the international search report

30/08/2001

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Lloyd, P

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

Invention Publication No

PCT/FR 01/01274

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5537494 A	16-07-1996	AU 7986491 A EP 0548080 A GB 2244805 A WO 9119263 A	31-12-1991 30-06-1993 11-12-1991 12-12-1991
GB 2272515 A	18-05-1994	BR 9204840 A DE 4244308 A FR 2698192 A US 5375071 A	07-06-1994 30-06-1994 20-05-1994 20-12-1994
DE 4325269 A	02-02-1995	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

D. id internationale No

PCT/01/01274

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G01B11/00 G01B11/02

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G01B G06T

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

WPI Data, PAJ, EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 5 537 494 A (TOH PENG S) 16 juillet 1996 (1996-07-16) le document en entier	1-12
A	GB 2 272 515 A (ONA ELECTRO EROSION) 18 mai 1994 (1994-05-18) le document en entier	1
A	DE 43 25 269 A (ZEISS CARL JENA GMBH) 2 février 1995 (1995-02-02) abrégé	1

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

T document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

X document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

Y document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

Z document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

17 août 2001

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

30/08/2001

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Lloyd, P

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Document internationale No

PCT/FR 01/01274

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5537494 A	16-07-1996	AU 7986491 A	31-12-1991
		EP 0548080 A	30-06-1993
		GB 2244805 A	11-12-1991
		WO 9119263 A	12-12-1991
GB 2272515 A	18-05-1994	BR 9204840 A	07-06-1994
		DE 4244308 A	30-06-1994
		FR 2698192 A	20-05-1994
		US 5375071 A	20-12-1994
DE 4325269 A	02-02-1995	AUCUN	

THIS PAGE BLANK (USPTO)
